

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2023.11.09

TiAl合金与镍基高温合金钎焊连接研究现状

李云月, 董 显, 沈元勋, 秦 建, 刘德运, 赵明远

郑州机械研究所有限公司 新型钎焊材料与技术国家重点实验室, 河南 郑州 450001

摘要: Ni基高温合金以其优异的性能,如较高的强度、良好的抗氧化及抗腐蚀能力等,在飞行器领域得到了广泛应用。TiAl系高温合金因其熔点高、比强度高、密度低、抗蠕变性能好等优点,被认为是制造航天器和飞机发动机最有前途的工程材料之一。采用TiAl合金与Ni基高温合金钎焊构件取代部分Ni基高温合金,能更好地满足飞行器高速化、轻量化的发展要求。综述了TiAl合金与镍基高温合金的钎焊技术研究现状,通过对现有TiAl合金与镍基高温合金焊接性研究的分析,介绍了包括Ti基钎料、Ni基钎料等钎焊材料的选取,阐述不同钎焊材料与钎焊工艺接头界面物相形成机理,指出TiAl合金与镍基高温合金钎焊技术研究与发展过程中存在的不足,并展望了TiAl合金与镍基高温合金钎焊技术未来发展方向,为TiAl合金与镍基高温合金钎焊连接的相关研究和工程应用提供理论依据和技术支撑。

关键词: TiAl系高温合金; Ni基高温合金; 钎焊; 力学性能; 微观组织

中图分类号: TG454 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2023)11-0056-09

Research Status of Brazing between TiAl Base Alloy and Nickel Base Superalloy

LI Yunyue, DONG Xian, SHEN Yuanxun, QIN Jian, LIU Deyun, ZHAO Mingyuan

State Key Laboratory of Advanced Brazing Filler Metals and Technology, Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering Co., Ltd.,
Zhengzhou 450001, China

Abstract: Ni based high-temperature alloys have been widely used in the field of aircraft due to their excellent properties, such as high strength, good oxidation and corrosion resistance. TiAl based high-temperature alloys are considered one of the most promising engineering materials for manufacturing spacecraft and aircraft engines due to their high melting point, high specific strength, low density, and good creep resistance. The use of TiAl alloy and Ni based high-temperature alloy brazing components to replace some Ni based high-temperature alloys can better meet the development requirements of high-speed and lightweight aircraft. This article summarizes the current research status of brazing technology between TiAl alloy and nickel based high-temperature alloy. By analyzing the weldability research of existing TiAl alloy and nickel based high-temperature alloy, the selection of brazing materials including Ti based brazing materials and Ni based brazing materials is introduced. The formation mechanism of different brazing materials and the interface material of brazing joints is explained. Finally, the shortcomings in the research and development process of brazing technology between TiAl alloy and nickel based high-temperature alloy are pointed out, And the future development direction of brazing technology between TiAl alloy and nickel based high-temperature alloy is prospected, providing theoretical basis and technical support for the related research and engineering application of brazing connection between TiAl alloy and nickel based high-temperature alloy.

Keywords: Ti₃Al(TiAl)-based alloy; nickel-based superalloy; brazing; mechanical properties; microstructure

引用格式: 李云月, 董显, 沈元勋, 等. TiAl合金与镍基高温合金钎焊连接研究现状[J]. 电焊机, 2023, 53(11): 56-64.

Citation: LIYunyue, DONG xian, SHEN Yuanxun, et al. Research Status of Brazing between TiAl Base Alloy and Nickel Base Superalloy[J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(11): 56-64.

收稿日期: 2023-01-14 修回日期: 2023-05-32

作者简介: 李云月(1995—), 工程师, 硕士研究生, 主要从事先进钎焊工艺的研究。

通信作者: 董 显(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事先进钎焊及特种连接技术研究。E-mail: dongxian83@163.com。

0 引言

镍基高温合金具有高强度、高韧性和抗蠕变能力,在高温下具有良好的抗氧化和抗腐蚀能力。合金中 Cr, Ti, Al, Co, Fe, Nb, Mo, W 和 Ta 等元素的存在进一步提升镍基高温合金强度,因此该材料被广泛应用于航空航天发动机部件,如导叶、涡轮叶片、涡轮盘等部件均由镍基高温合金材料制备而成。

随着航空航天等高端行业的快速发展,各种飞行器,探测器向高速化、远射程、轻量化、高可靠方向快速发展,对材料性能要求也越来越高^[5-7]。以 Ti₃Al(TiAl)金属间化合物为基体的 TiAl 系高温合金,因其熔点高、比强度高、密度低、抗蠕变性能好等优点,被认为是制造航天器和飞机发动机最有前途的工程材料之一^[8-9]。与目前航空航天领域广泛使用的镍基高温合金相比, TiAl 系合金可以显著减轻飞机质量,提高其发射和飞行效率。但是采用 TiAl 系合金整体加工零件难度很大,并且成本较高。如果将 TiAl 系合金与镍基高温合金进行连接,则可以同时结合两种材料性能上的优势,并能降低成本,进而实现 TiAl 系高温合金和镍基高温合金在航空航天领域的深化应用。

1 TiAl 系合金与镍基高温合金焊接性分析

目前, TiAl 系合金的连接方法主要有熔焊、摩擦焊、扩散焊、钎焊等^[10-13]。在众多焊接方法中,熔焊易产生裂纹、接头力学性能较差;摩擦焊与扩散焊虽然实现了 TiAl 系合金的连接,但是接头区域组织易长大粗化,导致接头内有众多脆性相生成。钎焊具有操作简单、焊接温度较低、基体不熔化、接头强度高、接头适应性广等优点,将钎焊应用于 TiAl 系合金的连接,对拓宽其应用范围有着重要作用^[14]。

氩弧焊、电子束焊、钎焊和扩散焊均可以实现镍基高温合金的连接^[15-18],但由于镍基高温合金中添加了 W/Cr/Co/Mo 等固溶强化元素和 P/S/C/B 等微量元素,焊缝裂纹的敏感性将提高,使得焊后显微组织存在成分偏析、脆性相增加等缺陷,这将导

致接头力学性能的下降。

对于 TiAl 合金与镍基高温合金的连接,两种材料的化学成分差异明显,获得良好的焊接接头对 TiAl 合金与镍基高温合金的有效连接至关重要。两种材料的热膨胀系数也有很大的不同^[19-20],在焊接过程中产生的残余应力会使接头力学性能降低。另外,由于 Ti 的活性较大,与 Ni、Al 之间容易发生反应^[21-22],因此, Al-Ni-Ti 体系金属间化合物容易形成,进而导致接头强度降低。

因此,为了成功地将 TiAl 合金与镍基高温合金进行连接,必须选择合适的焊接方法和工艺,以避免接头残余应力的产生,减少焊缝中金属间脆性化合物相的生成^[23-26]。钎焊属于整体均匀加热,引起的应力和变形小,在保证焊件整体尺寸与精度的同时钎焊工艺生产效率高,单次可实现上万条焊缝的连接,并且可实现多个零件同时钎焊。本文对 TiAl 系合金与镍基高温合金异种金属之间钎焊的进展进行综述,主要探讨钎焊过程中钎料成分及工艺对钎焊质量的影响。

2 TiAl 系合金与镍基高温合金国内外钎焊研究现状

2.1 Ti 基钎料钎焊 TiAl 系合金与镍基高温合金

陈波等^[27]采用 Ti-Zr-Cu-Ni 钎料真空钎焊 Ti₃Al/GH536。由于两种材料成分差异很大,在钎焊接头中产生了 Fe-Ti、Ni-Ti 等脆性化合物。此外,钎焊接头基体中存在较长的纵向裂纹,严重影响钎焊接头性能。在钎焊温度为 960 °C、保温 5 min 时,接头的平均剪切强度仅为 86.4 MPa。

LI 等^[28]研究了采用 Ti-Zr-Cu-Ni-Fe-Co-Mo 钎料在不同钎焊温度和钎焊时间下所获 γ -TiAl/GH536 钎焊接头的组织和性能。结果表明: γ -TiAl/GH536 钎焊接头存在 4 种界面反应层。当钎焊温度为 1 090~1 170 °C,钎焊时间为 0~20 min 时,焊缝厚度和接头平均抗剪强度呈先增大后减小的趋势。当钎焊温度为 1 150 °C、钎焊时间为 10 min 时,接头的抗剪强度最高,达到 262 MPa(见图 1),断口形貌为典型解理断口,主要由块状 Al₃NiTi₂ 脆性金属间

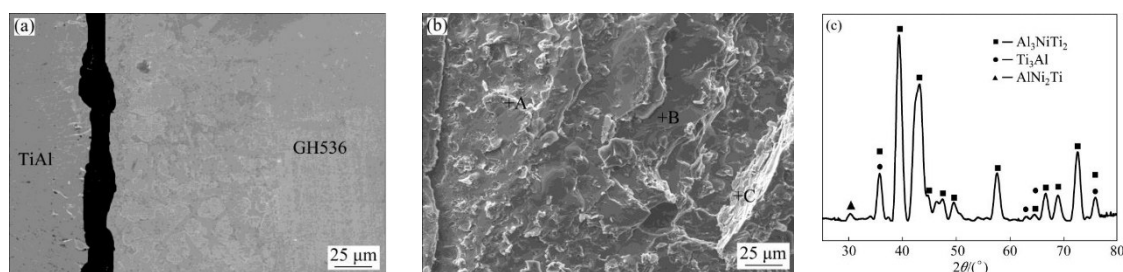


图1 1150 °C钎焊10 min的接头剪切断裂路径、断口形貌及断口XRD衍射图谱^[28]

Fig. 1 Shear fracture path and fracture morphology of joint brazed at 1150 °C for 10 min; XRD pattern of fracture surface after shear test^[28]

化合物组成。脆性 Al_3NiTi_2 和 TiNi_3 金属间化合物是裂纹产生和接头强度下降的主要因素。

Zhang等^[29]采用Ti-33Zr-16Cu-13Ni钎料实现了 $\text{Ti}_5\text{Si}_3/\text{Ti}_3\text{Al}$ 复合材料与Inconel 718合金的可靠钎焊。在钎焊温度为900 °C、保温时间5 min时,接头

显微组织如图2所示,典型组织为 $\text{Ti}_5\text{Si}_3/\text{Ti}_3\text{Al}/\text{Ti}_3\text{Al}/\text{Ti}_5\text{Si}_3+\text{Ti}_2\text{Ni}+\alpha-\text{Ti}/\text{Ti}_2\text{Ni}+\text{Fe}_2\text{Ti}/\text{Cr}_7\text{Ni}_3+\text{TiNi}_3+\text{Ni}(\text{Cr}, \text{Fe})$ 固溶体/Inconel 718基体。最佳的抗剪强度为208 MPa。在600 °C和650 °C条件下,接头的高温剪切强度分别达到335 MPa和365 MPa。

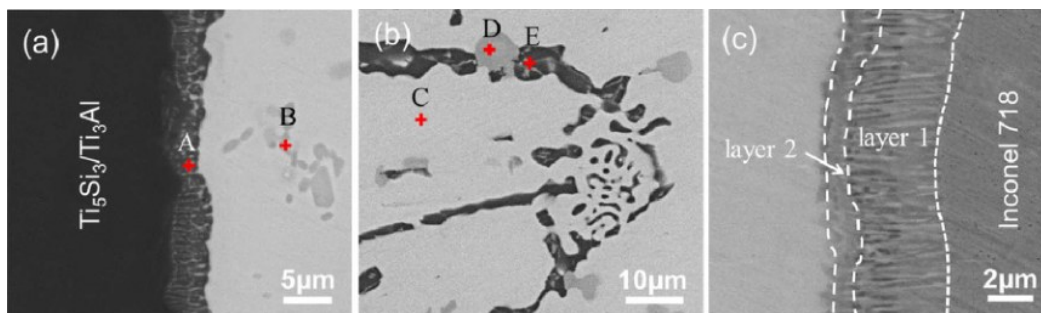


图2 钎焊温度900 °C,保温5min的高放大图像^[29]

Fig. 2 High magnification image of brazing temperature 900 °C and holding time 5 minutes^[29]

王华平^[30]采用单辊旋浮法制备了TiZrBeCo系非晶钎料,对GH536和TiAl合金进行钎焊,钎焊界面典型结构为:(Ni-Fe-Cr)固溶体/富Ti(Ni-Cr-Fe)固溶体/含有 Ti_2Ni 、 NiZr_2 析出相的TiZrBe共晶组织/TiZrBe共晶组织/富Al(TiZr)固溶体组织/TiAl合金母材的TiAl、 Ti_3Al 。钎焊过程中,非晶态钎料TiZrBeCo与TiAl合金和GH536母材组元相互溶解、相互扩散并形成新相,这种伴随着扩散而产生新相的反应扩散行为是异质接头获得良好性能的关键。在钎焊温度850 °C、保温时间40 min时,室温剪切强度达297 MPa。

董多^[31]分别采用Ti-28Ni合金钎料及TiCrCuNi非晶钎料对TiAl合金和GH4169进行钎焊。两种钎焊接头形成的典型组织为: $\text{TiAl}/\alpha_2-\text{Ti}_3\text{Al}+\text{Al}_3\text{NiTi}_2/\text{Ti}_2\text{Ni}+\text{Ti}_{(\text{ss})}+\alpha_2-\text{Ti}_3\text{Al}/\text{Cr}(\text{Cr}, \text{Ni})_{\text{ss}}+\text{Ni}(\text{Cr}, \text{Ni})_{\text{ss}}/\text{GH4169}$; $\text{TiAl}/\alpha_2\text{Ti}_3\text{Al}+\text{Al}_3(\text{Ni}, \text{Cu})\text{Ti}_2+\text{Al}(\text{Ni}, \text{Cu})_2\text{Ti}/\text{AlCu}_2(\text{Ti}, \text{Zr})+(\text{Ti}, \text{Zr})(\text{Ni}, \text{Cu})+\text{Ti}_2(\text{Ni}, \text{Cu})/\text{Cr}(\text{Ni}, \text{Cr}, \text{Fe})_{\text{ss}}+\text{Ni}$

$(\text{Ni}, \text{Cr}, \text{Fe})_{\text{ss}}/\text{GH4169}$ 。使用Ti-28Ni钎料连接时,随着钎焊温度的升高,接头的剪切强度先升高后下降。在钎焊温度为1010 °C时,接头的剪切强度达到最大,约为183.7 MPa;980 °C时反应层较薄,接头断裂于GH4169侧的反应区。在1010 °C的接头中, GH4169侧反应区的厚度明显增加,其承受载荷能力升高,所以接头强度较高。在更高的钎焊温度下,由于热裂纹的存在,接头强度有所降低。使用TiCrCuNi非晶钎料连接时,随着钎焊温度的升高,接头强度呈逐渐增加趋势,在960 °C时达到最大值241.9 MPa。在900 °C、930 °C钎焊时,接头主要沿GH4169母材附近的反应层断裂;在960 °C钎焊时,断裂位置转移至钎缝中心处;进一步提高钎焊温度, Ti、Al、Ni等合金元素进一步向钎缝中心扩散,脆性的 $\text{Al}(\text{Ni}, \text{Cu})_2\text{Ti}$ 相体积分数增加,同时在钎焊过程中脆性相发生粗化,钎焊接头的力学性能降低。

许鹏等^[32]在Ti-Cu-Ni基钎料中加入La元素,

并钎焊 Ti₃Al 合金和 GH536 高温合金。La 元素的加入不仅降低了液态钎料的表面张力、提高钎料的润湿铺展能力,而且影响了接头的微观组织,改善了接头的力学性能。当 La 含量为 1.5% 时,钎焊接头的抗拉强度达到 273 MPa。

Li 等^[33]以 Ti 为中间层,实现了 TiAl 与 GH99 高温合金的接触反应钎焊。试验研究了 GH99 高温合金中主要合金元素 Cr、Mo、W 和 Co 对接头界面组织演变的影响。结果表明,合金元素主要集中在 GH99 高温合金相邻区域的 (Ni, Cr)_{ss}(γ) 相和接头中部区域的 Ti₃Al(α 2)+ α -Ti+ β -Ti 相中。与 Ni/Ti/TiAl 接头相比, GH99 中的合金元素延缓了 GH99/Ti/TiAl 接头液相的形成。此外,这些溶解在 GH99/Ti/TiAl 结合部的合金元素不仅是 β -Ti 相稳定元素,

促进了 β -Ti+ α -Ti+ α 2 相的形成,还能提高 GH99/Ti/TiAl 接头的延展性和高温性能。

2.2 Ni 基钎料钎焊 TiAl 系合金与镍基高温合金

何鹏等^[34]采用 BNi2 钎料钎焊 TiAl 基合金与 GH99 镍基高温合金。钎焊接头的典型界面结构为 GH99/ γ +Ni₃B+CrB+Ti-B/TiNi₂Al/TiNiAl+Ti₃Al/TiAl, 界面组织形貌如图 3 所示。随着钎焊温度或保温时间的增加, BNi2 钎料向基体中扩散的 B、Si 元素增多,接头中的硼化物含量降低,钎缝中 TiNi₂Al 和 TiNiAl+Ti₃Al 厚度增加。当钎焊温度为 1 050 °C、保温时间 5 min 时,接头的抗剪强度达到 205 MPa,接头断裂主要发生在 TiNiAl 金属间化合物层。钎焊温度或保温时间的进一步增加会导致 TiNiAl 金属间化合物增多,从而降低连接性能。

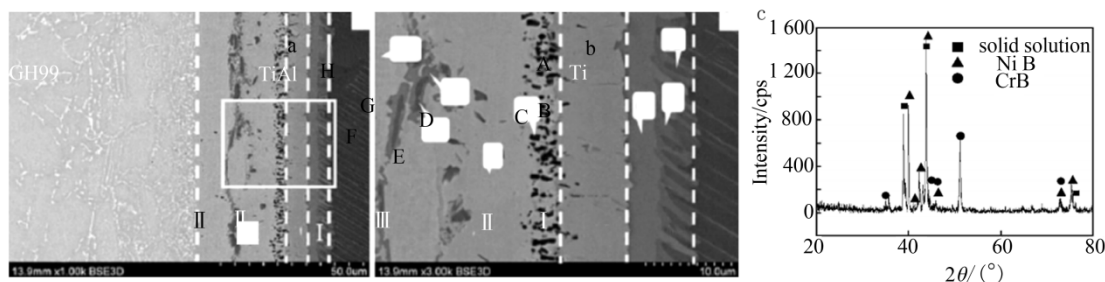


图 3 TiAl/BNi-2/GH99 钎焊接头的界面组织形貌及 XRD 图谱^[34]

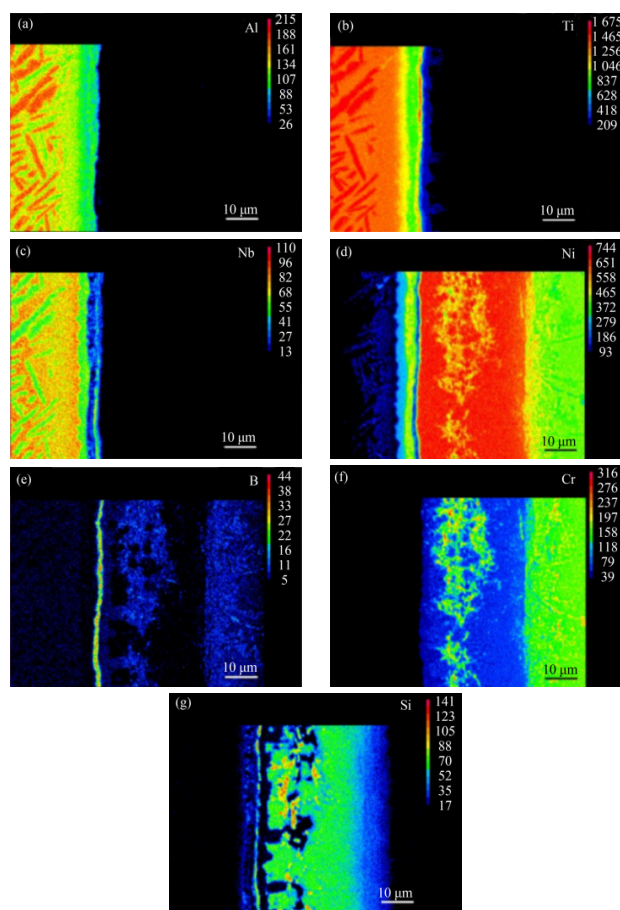
Fig. 3 Interfacial microstructure of the joint brazed at 1050 °C for 10 min^[34]

Ren 等^[35]采用 NiCrFeSiB 钎料对 Ti₂AlNb 合金和 GH536 高温合金进行钎焊,钎焊接头元素区域分布如图 4 所示。在靠近 Ti₂AlNb 母材的接头处形成了 Ti₂Ni(Al, Nb)、AlNi₂Ti 和 TiB₂脆性金属间化合物层。这些脆性反应层导致焊缝处显微硬度增高,力学性能下降。通过等温凝固形成 γ 固溶体,在冷却过程中 β_1 -Ni₃Si 相在 γ 固溶体中析出。钎缝中形成了 Ni₃B、 β_1 -Ni₃Si 和 CrB 相。在 GH536 母材合金的扩散影响区内形成块状和针状的硼化物。Ti₂AlNb/GH536 钎焊接头在室温下的最大抗拉强度为 425 MPa,在 923 K 时抗拉强度达到 373 MPa。

Dong 等^[36]针对 TiAl 基和 Ni 基高温合金钎焊的难点,提出一种新的钎焊方法——热塑性钎焊,采用热塑性键合方法制备了高温(Ni₆₀Nb₁₅Zr₁₅Ti₁₀)₉₈Co₂块体金属玻璃(BMG)合金,并将其作为钎料连接 TiAl-Ni 基高温合金。讨论了 BMG 在过冷液相区的超塑性填充行为和钎料熔点以下的原子扩散。

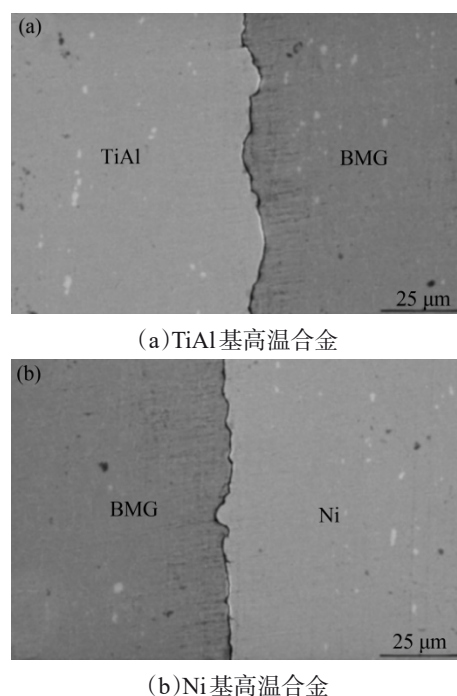
研究表明 BMG 在过冷液相区发生超塑性变形后,母材与 BMG 钎料之间首次实现了良好的预结合,如图 5 所示。在外力作用下, BMG 完全填充了界面区域的裂纹和孔洞。接头内新形成的相有两种模式:非晶晶化,钎料与基体合金之间的相互扩散和反应。中间区域首先形成了尺寸较小的等距基体相 AlNi₂Ti,然后在界面区域形成了 NiNb 和 Ti-Al-Ni 金属间化合物。室温和 1 023 K 下的剪切强度分别高达 365 MPa 和 260 MPa。

胡胜鹏等^[37]采用非晶态 BNi-2 钎料实现了高钎 TiAl 合金(TAN)与 GH536 合金的连接,并获得组织和性能良好的钎焊接头。钎焊接头的典型界面组织为 TAN/B₂+ τ 3/ τ 4+ (Ni-Ti)-B/ γ + (Ni-Ti)-B+CrB+ (Ni_(s,s))/GH536。研究了钎焊温度对接头界面微观组织的影响,结果发现 BNi-2 钎料中 B 元素向母材中的扩散以及 GH536 高温合金向液态钎料中的溶解对界面组织结构演变有至关重要的

图4 钎焊接头元素区域分布^[35]Fig. 4 Element area distribution maps^[35]

作用。而随着钎焊温度的升高,钎焊接头扩散IV区逐渐消失, τ_3/τ_4 化合物层及钎缝区域均逐渐增厚,黑色CrB相发生粗化,细小点状(Ni-Ti)-B含量减少,如图6所示。钎焊温度1160℃、保温10 min时的钎焊接头最大室温抗剪强度为106.8 MPa,在700℃高温下的抗剪强度为76.2 MPa,高温剪切强度降低约28.6%,接头均呈现脆性断裂模式。

Kokabi^[38]等研究了用Ni-4Si-3.2B钎料钎焊TiAl合金与IN738镍基高温合金的工艺-组织-强度相关性。分析了固/液反应、凝固现象和固态现象。采用Larson-Miller参数(LMP)对不同钎焊条件(保温时间和温度)下的无热凝固区和反应层厚度进行了测定和分析。结果表明,利用LMP法可以计算粘结温度和保温时间对接头抗剪强度的影响。热凝固区和反应层的大小是控制接头强度的两个关键因素。在较低钎焊温度/保温时间条件下,接头的剪切强度与焊缝中心共晶硼化物的宽度相关。然而,



(a) TiAl 基高温合金

(b) Ni 基高温合金

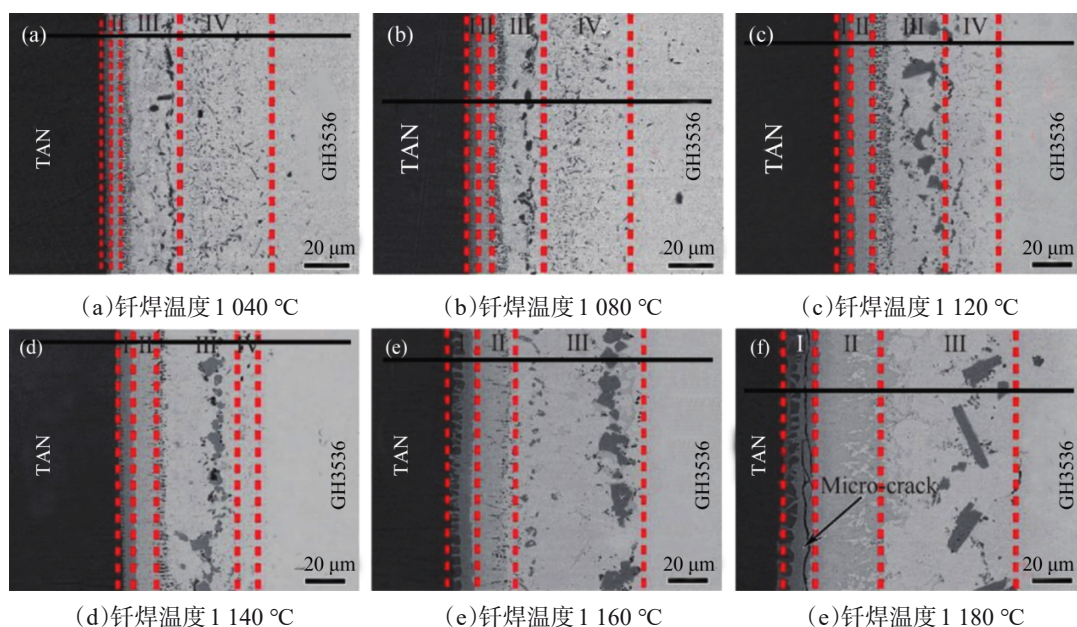
图5 TiAl和Ni基合金在过冷液相区超塑性变形后界面的微观形貌^[36]Fig. 5 Microscopic morphology of interfaces of TiAl-based and Ni-based alloys after superplastic deformation in the superliquid region^[36]

反应层的宽度是在较高温度/次数(即高LMP)下制作的接头强度的主导因素。在LMP最优值处,钎焊接头抗剪强度最高。

2.3 其他钎料钎焊TiAl系合金与镍基高温合金

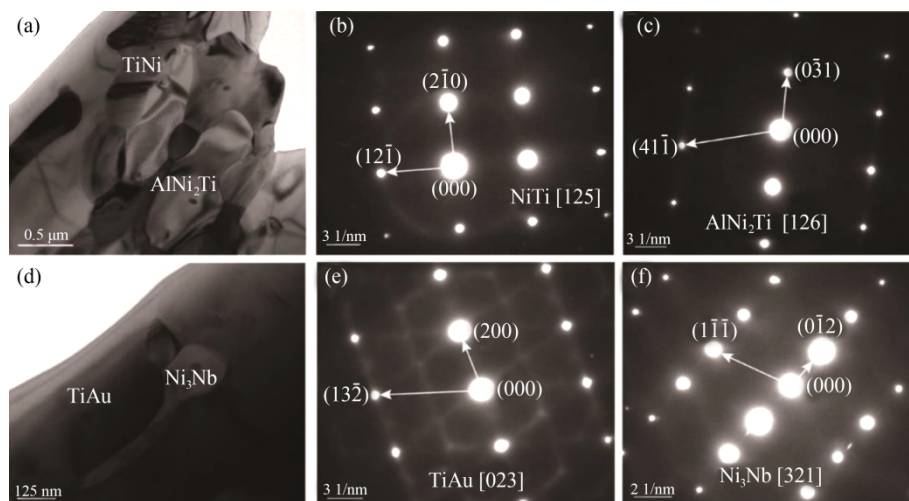
Sequeiros等^[39]用AgCuTi钎料采用活性金属钎焊法实现 γ -TiAl合金与Inconel 718连接。钎焊界面典型微观结构为:(Ag)+AlNi₂Ti/(Ag)+(Cu)+AlCu₂Ti/AlCu₂Ti+(Ag)。随着钎焊温度的升高,界面厚度增加,组织粗化。在焊缝处产生多层界面。接头界面处产生AlNi₂Ti、AlCu₂Ti等脆性相,钎焊接头硬度从接头的边缘向富含Ag的中心逐渐降低。在钎焊温度730℃、保温10 min时,钎焊接头的平均抗剪强度最高为228±83 MPa。接头主要在Inconel 718合金的AlNi₂Ti反应层发生断裂。

Ren等^[40]采用Au-17.5Ni钎料对Ti₃Al基合金与GH536合金进行钎焊连接。Ti₃Al/GH536接头组织具有多层结构的特征,如图7所示。Au-Ni钎料中的Ni元素与Ti₃Al母材反应生成AlNiTi和NiTi化合物。Ti₃Al母材中的Nb元素与Ni发生反应,在焊缝中心区域检测到Ni₃Nb相。由于Ni基高温合金的

图 6 钎焊温度对 TAN/BNi-2/GH3536 接头界面微观组织形貌的影响^[37]Fig. 6 Effect of different temperature on interfacial microstructure of TAN/BNi-2/GH3536 joints^[37]

溶解,在 GH536 合金侧可见 (Ni, Au) 固溶体和富 Ni 相。在 1 253 K 钎焊 5~20 min 后,所有接头室温平均抗拉强度均大于 356 MPa。1 253 K/15 min 钎焊

后的室温抗拉强度最高达 434 MPa, 923 K 钎焊后的抗拉强度最高达 314 MPa。AlNi₂Ti 化合物的硬度区最高,拉伸试验试样的断裂主要发生在该区域。

图 7 Ti₃Al/GH536 接头组织多层结构: (a) NiTi 和 AlNi₂Ti 相的 TEM 显微图^[40]; (b) NiTi (简单立方); (c) AlNi₂Ti (体心立方, bcc) 相的区域电子衍射图; (d) TiAu 和 Ni₃Nb 相的 TEM 显微图; (e) TiAu (bcc); (f) Ni₃Nb (六方密排, hcp) 相的区域电子衍射图Fig. 7 Multilayer Structure of Ti₃Al/GH536 Joint organization

Dong 等^[41]制备了 CuTiZrNi 非晶钎料,成功钎焊高 Nb-TiAl 合金和 GH4169 高温合金,并研究 900~1 020 °C 温度范围内钎焊接头的微观结构和力学性能。结果表明,高 Nb-TiAl/GH4169 接头界面微观结构为高 Nb-TiAl 合金/Ti₃Al+Al₃(Ni, Cu)Ti₂+Al(Ni, Cu)₂Ti/AlCu₂(Ti, Zr)+(Ti, Zr)(Ni 和 Cu)+Ti₂

(Ni)/Cr 富 (Cr, Ni, Fe)_{ss}+Ni 富 (Ni; Cr, Fe)_{ss}/GH4169 合金。随着钎焊温度的升高,基体与钎料之间的元素扩散加剧,界面反应层增厚。在 960 °C 时,接头的最大剪切强度约为 241.9 MPa。在较高的钎焊温度下,过多的 AlCu₂(Ti, Zr) 相和粗大的 Ti₂(Ni, Cu) 由于其固有的脆性而导致接头性能恶化。

Dong 等^[42]制备了非晶态 Zr58.6Al15.4Ni20Co6 钎料,在不同的钎焊温度和保温时间下进行了 TiAl 基和 Ni 基合金的真空钎焊试验。钎焊后由非晶态钎料的界面原子扩散和结晶形成了 TiAl 基扩散层(DL)、TiAl 基结晶和反应层(CRL)、结晶层(CL)、Ni 基结晶和反应层(CRL)和 Ni 基扩散层(DL)五个不同的区域。能谱分析结果表明,钎焊后钎料与基体之间发生了充分的相互扩散,接头中形成了与基体合金不同的细化相,并分散分布在接头中。随着保温时间和加热温度的增加,钎焊接头强度先增大后减小,钎焊接头在室温(RT)和高温(HT)下都具有较高的强度,在 30 °C 和 600 °C 时的最大抗剪强度分别为 353 MPa 和 214 MPa。

3 结论

经过国内外学者的多年努力,TiAl 系合金与 Ni 基高温合金异种金属钎焊连接研究已经得到一定进展,但 TiAl 系合金与 Ni 基高温合金异种金属钎焊仍然存在一些关键基础科学问题和应用技术难点,需要系统深入地开展探索研究。

(1)TiAl 系合金与 Ni 基高温合金的连接由于异种金属之间的物化性能差异巨大,常规的焊接方法使得焊接接头界面处生成大量的脆性金属间化合物,导致焊接接头性能较差。使用钎焊方法实现 TiAl 系合金与 Ni 基高温合金的连接有一定的优势,但是尽管采用了不同体系的钎料及不同的钎焊工艺,在钎焊界面处仍会有脆性金属间化合物产生,导致钎焊接头强度低,在高温及大负荷条件下接头性能不稳定。因此,在 TiAl 系合金与 Ni 基高温合金钎焊技术研究方面,仍需开发更适宜的钎料成分,并辅助钎焊工艺和设备的改进。

(2)目前机理性的研究较为缺乏,现有研究多为钎焊工艺参数对接头组织性能的影响,并未对接头界面物相形成机理进行分析。探索接头界面各原子扩散行为,构建界面脆性反应层生长机制物理模型,对揭示 TiAl 系合金与 Ni 基高温合金异种材料接头形成机理极为重要,也是获得各项性能优质的钎焊接头的关键所在。

参考文献:

- [1] 王会阳,安云岐,李承宇,等.镍基高温合金材料的研究进展[J].材料导报,2011,25(S2):482-486.
WANG H Y, AN Y Q, LI C Y, et al. Research Progress of Ni-based Superalloys [J]. Materials Reports, 2011, 25(S2): 482-488.
- [2] 黄乾尧,李汉康.高温合金[M].北京:冶金工业出版社,2000.
- [3] 姚进军,高联科,邓斌.镍基高温合金的技术进展[J].新材料产业,2015(12):43-46.
YAO J J, Gao L K, Deng B. Technological progress of nickel based high-temperature alloys [J]. New Materials Industry, 2015(12): 43-46.
- [4] 王睿.镍基高温合金的研究和应用[J].当代化工研究,2017(7):50-51.
WANG R. Research and Application of Nickel-Based High Temperature Alloy [J]. Modern Chemical Research, 2017(7):50-51.
- [5] Lu Q B, Long W M, Zhong S J, et al. TZM graphite interface behavior in high-temperature brazing by Ti [J]. Welding in the World, 2020, 64: 1877-1885.
- [6] 张远,黄旭,路坤锋,等.高超声速飞行器控制技术研究进展与展望[J].宇航学报,2022,43(07):866-879.
ZHANG Y, HUANG X, LU K F, et al. Research Progress and Prospect of the Hypersonic Flight Vehicle Control Technology [J]. Journal of Astronautics, 2022, 43(07): 866-879.
- [7] 王在铎,王惠,丁楠,等.高超声速飞行器技术研究进展[J].科技导报,2021,39(11):59-67.
WANG Z D, Wang H, Ding N, et al. Progress in Research on Hypersonic Aircraft Technology [J]. Science and Technology Bulletin, 2021, 39(11): 59-67.
- [8] 乌彦全,周军,张春波,等. Ti-Al 系金属间化合物焊接技术研究现状[J].电焊机,2019,49(05):32-38.
WU Y Q, Zhou J, Zhang C B, et al. Research status of welding technology for Ti-Al intermetallic compound [J]. Electric Welding Machine, 2019, 49(05): 32-38.
- [9] 李龙庆,王艳,宋晓国,等. TiAl 基合金真空钎焊接头组织性能分析[J].电焊机,2013,43(09):52-54.
LI L Q, Wang Y, Song X G, et al. Microstructure and performance of vacuum brazing joints in TiAl alloy [J]. Electric Welding Machine, 2013, 43(09): 52-54.
- [10] YUE H Y, CHEN Y Y, WANG X P, et al. Microstructure texture and tensile properties of Ti-47Al-2Cr-2Nb alloy produced by selective electron beam melting [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018,

- 766: 450–459.
- [11] XU X G, LIN J P, GUO J, et al. Friction weldability of a high Nb containing TiAl alloy[J]. *Materials*, 2019, 12(21): 3556–2562.
- [12] Simões S, Soares A, Tavares C J, et al. Joining of TiAl alloy using novel Ag–Cu sputtered coated Ti brazing filler[J]. *Microscopy and Microanalysis*, 2018, 25(1): 1–4.
- [13] SUN W, YANG F, KONG F T, et al. Interface characteristics of Ti6Al4V–TiAl metal intermetallic laminate (MIL) composites prepared by a novel hotpack rolling[J]. *Materials Characterization*, 2018, 144: 173–181.
- [14] 李娜. TiAl 合金的焊接性研究[J]. *有色金属设计*, 2021, 48(01): 114–117.
- LI N. Research on weldability of TiAl Alloy[J]. *Non-ferrous Metals Design*, 2021, 48(01): 114–117.
- [15] 刘彩云, 刘士伟, 孙元, 等. 高温合金熔化焊焊接性的研究进展[J]. *电焊机*, 2021, 51(01): 28–36.
- LIU C Y, LIU S W, SUN Y, et al. Research progress on weldability of high temperature alloy melting welding[J]. *Electric Welding Machine*, 2021, 51(01): 28–36.
- [16] 闫飞, 王春明, 胡席远. 高温合金 GH909 激光焊接工艺[J]. *电焊机*, 2014, 44(09): 6–9.
- YAN F, WANG C M, HU X Y. Study of the process of laser welding for low expansion superalloy GH909[J]. *Electric Welding Machine*, 2014, 44(09): 6–9.
- [17] 龙伟民, 张青科, 朱坤, 等. 绿色钎焊材料及无害化钎焊技术的发展[J]. *焊接*, 2014(01): 3–7.
- LONG W M, ZHANG Q K, ZHU K, et al. Development of green brazing filler metals and harmless brazing technologies[J]. *Welding & Joining*, 2014(01): 3–7.
- [18] 张胜, 侯金保, 郭德伦, 等. K403 合金高性能钎焊技术研究[J]. *航空材料学报*, 2006(03): 327–328.
- ZHANG S, HOU J B, GUO D L, et al. Study on High-Performance Brazing Technology of K403 Superalloy[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2006(03): 327–328.
- [19] 张翥, 王群骄, 莫畏. 钛的金属学和热处理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
- [20] 《中国航空材料手册》委员会. 中国航空材料手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [21] NIESSEN A. K., DE BOER F. R., BOOM R, et al. Model predictions for the enthalpy of formation of transition metal alloys II[J]. *Calphad*, 1983, 7(1): 51–70.
- [22] SCHUSTER J C, PAN Z, LIU S H, et al. On the constitution of the ternary system Al–Ni–Ti[J]. *Intermetallics*, 2007, 15(9): 1257–1267.
- [23] 陈冰清, 熊华平, 郭绍庆, 等. NiCuNbCr 焊料 Ti₃Al/GH4169 合金氩弧焊接头的组织及性能[J]. *材料工程*, 2014(04): 13–17+25.
- CHEN B Q, XIONG H P, GUO S Q, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Ti₃Al/GH4169 Superalloy Joints Arc Welded with NiCuNbCr Filler Alloy[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2014(04): 13–17+25.
- [24] 龙伟民, 张青科, 马佳, 等. 浅谈硬钎料的应用现状与发展方向[J]. *焊接*, 2013(01): 18–21.
- LONG W M, ZHANG Q K, MA J, et al. Review on application and development of brazing filler metals[J]. *Welding & Joining*, 2013(01): 18–21.
- [25] 龙伟民, 李胜男, 都东, 等. 钎焊材料形态演变及其发展趋势[J]. *稀有金属材料与工程*, 2019, 48(12): 3781–3790.
- LONG W M, LI S N, DU D, et al. Morphological evolution and Development Trend of Brazing Materials[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2019, 48(12): 3781–3790.
- [26] 周媛, 熊华平, 毛唯, 等. TiAl 合金与高温合金的扩散焊接头组织及性能[J]. *材料工程*, 2012(08): 88–91+100.
- ZHOU Y, XIONG H P, MAO W, et al. Microstructures and Property of Diffusion Bonded Joints Between TiAl Alloy and Two Kinds of Superalloys[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2012(08): 88–91+100.
- [27] 陈波, 熊华平, 毛唯, 等. 采用 Ti–Zr–Cu–Ni 真空钎焊 Ti₃Al/Ti₃Al 和 Ti₃Al/GH536 接头组织及性能[J]. *航空材料学报*, 2010, 30(05): 35–38.
- CHEN B, XIONG H P, MAO W, et al. Microstructures and Properties of Ti₃Al/Ti₃Al and Ti₃Al/GH536 Joints Using Ti–Zr–Cu–Ni Brazing Filler[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2010, 30(05): 35–38.
- [28] 李力, 赵巍, 冯志雪, 等. Ti–Zr–Cu–Ni–Fe–Co–Mo 钎料合金钎焊 γ–TiAl/GH536 接头的显微组织与剪切强度[J]. *中国有色金属学报(英文版)*, 2020, 30(08): 2143–2155.
- LI L, ZHAO W, FENG Z X, et al. Microstructure and shear strength of γ–TiAl/GH536 joints brazed with Ti–Zr–Cu–Ni–Fe–Co–Mo filler alloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2020, 30(08): 2143–2155.
- [29] ZHANG T, YANG X, MIAO K, et al. Microstructure

- evolution and brazing mechanism of Ti5Si3/Ti3Al composite and Ni-based superalloy joints using Ti-Zr-Cu-Ni filler alloy [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, 713: 28–34.
- [30] 王华平. TiAl-Ni 异种材料钎焊工艺研究[D]. 江苏: 南京理工大学, 2018.
WANG H P. Research on brazing process of TiAl-Ni dissimilar materials[D]. Jiangsu: Nanjing University of Science and Technology, 2018.
- [31] 董多. TiAl 合金钎焊接头界面行为与连接机理研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2022.
DONG D. Study on Interface Behavior and Connection Mechanism of TiAl Alloy Brazed Joint [D]. Beijing: Beijing University of Science and Technology, 2022
- [32] 许鹏, 康慧, 曲平, 等. 钎对钛基钎料钎焊 Ti₃Al 和 GH536 的影响[J]. *中国稀土学报*, 2007(02): 253–256.
XU P, KANG H, QU P, et al. Effect of Lanthanum on Brazing of Ti₃Al and GH536 with Ti-Based Filler Metals[J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 2007 (02): 253–256.
- [33] LI H, WEI H, HE P, et al. Effects of alloying elements in GH99 superalloy on microstructure evolution of reactive brazing TiAl/GH99 joints [J]. *Intermetallics*, 2013, 34: 69–74.
- [34] 何鹏, 李海新, 林铁松, 等. TiAl 基合金与 Ni 基合金钎焊连接接头界面组织及性能[J]. *稀有金属材料与工程*, 2013, 42(11): 2248–2252.
HE P, LI H X, LIN T S, et al. Interface microstructure and properties of TiAl based alloy and Ni based alloy brazed joints [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2013, 42 (11): 2248–2252.
- [35] REN H, REN X, LONG W, et al. Formation mechanism of interfacial microstructures and mechanical properties of Ti2AlNb/Ni-based superalloy joints brazed with NiCrFeSiB filler metal [J]. *Progress in Natural Science: Materials International*, 2021, 31(2): 310–318.
- [36] DONG K, KONG J, RUAN X D, et al. Thermoplastic brazing of TiAl- and Ni-based alloys utilizing a Ni-based bulk metallic glass as the filler metal [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 815: 141255.
- [37] 胡胜鹏, 李文强, 付伟, 等. BNi-2 非晶钎料钎焊高铌 TiAl 合金与 GH3536 合金接头组织与性能[J]. *航空学报*, 2021, 42(03): 423–434.
HU S P, LI W Q, FU W, et al. Interfacial microstructure and mechanical properties of high Nb containing TiAl alloy and GH3536 superalloy brazed using amorphous BNi-2 filler [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(03): 423–434.
- [38] KOKABI D K A, GHOLAMIPOUR R, et al. Factors affecting strength of dissimilar TiAl/Ni-Si-B/Ni-based superalloy brazed joint [J]. *Journal of Materials Science*, 2022, 57(8): 5275–5287.
- [39] SEQUEIROS E W, GUEDES A, PINTO A M P, et al. Microstructure and Strength of γ -TiAl Alloy/Inconel 718 Brazed Joints [J]. *Materials Science Forum*, 2012, 730–732: 835–840.
- [40] REN H S, XIONG H P, LONG W M, et al. Microstructures and mechanical properties of Ti3Al/Ni-based superalloy joints brazed with AuNi filler metal [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2019, 35 (9): 2070–2078.
- [41] DONG D, Shi K, ZHU D, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of high Nb-TiAl alloy/GH4169 joints brazed using CuTiZrNi amorphous filler alloy [J]. *Intermetallics*, 2021, 139: 107351.
- [42] DONG K W, KONG J. A high-strength vacuum-brazed TiAl/Ni joint at room temperature and high temperature with an amorphous foil Zr-Al-Ni-Co filler metal [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 44: 389–396.